

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В.Н. Каразіна

КНЯЗЄВ РОМАН РОМАНОВИЧ

УДК 539.017

ПРИСКОРЕННЯ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК КІЛЬВАТЕРНИМИ
ПОЛЯМИ В ПЛАЗМОВО-ДІЕЛЕКТРИЧНИХ СТРУКТУРАХ

01.04.08 – фізика плазми

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків — 2017

Дисертацією є рукопис
Роботу виконано в Харківському Національному університеті імені В.Н. Каразіна МОН України та в Національному Науковому Центрі "Харківський Фізико-технічний Інститут" НАН України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, с.н.с.,
начальник лабораторії ІПЕНМП ННЦ ХФТІ
Сотніков Геннадій Васильович

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, с.н.с.,
професор УкрДУЗТ
Гришанов Микола Іванович
доктор фізико-математичних наук, професор,
професор ХНУ імені В.Н. Каразіна МОН України
Денисенко Ігор Борисович

Захист відбудеться " ____ " _____ 2017 р. о ____ : ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.64.051.12 в Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна за адресою: 61108, м. Харків, просп. Курчатова 31, ауд. 301.

З текстом дисертації можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університета імені В.Н. Каразіна МОН України, яка знаходиться за адресою: 61077, м. Харків, пл. Свободи, 4.

Автореферат розіслано " ____ " _____ 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д.64.051.12



С.О. Письменецький

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Прискорювачі заряджених частинок представляють собою установки для отримання пучків заряджених частинок високих енергій від десятків кеВ до декількох ТеВ (протонів, електронів, античастинок, ядер інших атомів). Їм вже давно відведено належне місце у фізиці високих енергій. Потреби фізиків, які вивчають речовину, енергію, простір і час, є головним стимулом розвитку прискорювальної техніки для збільшення енергії, зменшення фазового об'єму і емітансу.

Розрізняють два принципово різні підходи до прискорювальної фізики. Перший - це використання традиційних методів прискорення, але традиційні високочастотні прискорювачі мають обмеження для градієнту прискорення ~ 100 МеВ/м. Другий підхід - це застосування альтернативних методів прискорення, які дозволяють отримати градієнт прискорення $\sim 1 - 100$ ГеВ/м. Одним з таких альтернативних методів є прискорення заряджених частинок кільватерними полями. Кільватерні поля збуджують одиничним згустком заряджених частинок, послідовністю згустків заряджених частинок або лазерним імпульсом. Ідея використання полів, які збуджуються згустком заряджених частинок в плазмі, була висловлена давно. Також було проведено багато досліджень саме діелектричних уповільнюючих структур. Нову хвилю інтересу світової прискорювальної спільноти до прискорення заряджених частинок в діелектричних кільватерних прискорювачах як до високоградієнтного прискорення викликав той факт, що деякі діелектрики здатні витримувати великі поля (> 1 ГВ/м) продовж короткого часу проходження заряджених пучків уздовж каналу в діелектрику.

Дисертаційна робота присвячена актуальній проблемі збільшення темпів прискорення в альтернативних прискорювачах заряджених частинок, що дозволить істотно знизити їх вагогабаритні характеристики і зробити якісний стрибок в дослідженнях в галузі фізики плазми і фізики високих енергій. У разі успішної реалізації зменшення вагогабаритних характеристик прискорювачів заряджених частинок і зменшення вартості їх виробництва очікується стрімке зростання кількості застосувань прискорювачів та їх використання в повсякденному житті.

В дисертації вперше було запропоновано використовувати переваги плазмових та діелектричних структур в новому типі кільватерних структур - плазмово-діелектричних структурах. У дисертації основний акцент зроблено на одноканальні плазмово-діелектричні структури. З урахуванням розвитку сучасних технічних можливостей, розглядається використання саме плазмово-діелектричних кільватерних прискорювачів як перспективний якісний перехід від класичних прискорювачів. Спираючись на вищесказане, можна стверджувати, що розроблювана тематика, а саме побудова лінійної та нелінійної теорії й числове моделювання плазмово-діелектричного кільватерного прискорювача є важливим і актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, матеріали яких містяться в дисертації, проводилися в ХНУ ім. В.Н. Каразіна та в ННЦ "Харківський фізико-технічний інститут" НАН України в рамках виконання планових бюджетних науково-дослідних робіт:

- "Програма фундаментальних досліджень ННЦ ХФТІ з атомної науки і техніки до 2015 р затверджена постановою Кабінету Міністрів Украї-

ни № г/р 0112U002026 в рамках теми: "Розробка основ плазмової НВЧ-електроніки, новітніх методів прискорення заряджених частинок, інерційного термоядерного синтезу, заснованого на пучках важких іонів" (шифр теми III-2-11), ІПЕНМП ННЦ ХФТІ, (2011-2015 р), (роль автора дисертації - виконавець).

- програма НАН України "Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій проект П-1/63-2014 «Розробка фізичних принципів плазмово-діелектричного кільватерного прискорювача». Затверджено постановою президії НАН України № 151 від 12.03.2014, (2014-2016 р)(роль автора дисертації - виконавець).
- "Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 07.09.2011 р. № 942 в рамках теми: "Структурні ефекти в сильних і електромагнітних взаємодіях та особливості радіаційного впливу на наноструктури номер державної реєстрації НДР: 0115U000474, ХНУ ім. В.Н. Каразіна, (2016 р), (роль автора дисертації - виконавець).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є створення теоретичної бази для застосування альтернативних методів прискорення, зокрема методу прискорення заряджених частинок кільватерними полями у реальних експериментах, що в майбутньому дозволить істотно розширити можливості експериментальних досліджень з фізики високих енергій та фізики плазми, а також зменшить витрати при створенні нових прискорювачів надвисоких енергій.

Для досягнення поставленої мети потрібно було розв'язати наступні **завдання**:

1. Побудувати лінійну теорію збудження кільватерних полів у плазмово-діелектричній структурі.
2. Дослідити можливість одночасного фокусування та прискорення згустку в плазмово-діелектричній структурі.
3. Вивчити вплив щільності плазми на амплітуду кільватерного поля у діелектричній структурі.
4. Провести числове моделювання збудження кільватерних полів у плазмово-діелектричній структурі.
5. Провести числове моделювання динаміки прискорюваного згустку в плазмово-діелектричному кільватерному прискорювачі.
6. Дослідити вплив початкового емітансу прискорюваного згустку на його фокусування.
7. Розробити новий метод транспортування згустків у плазмово-діелектричному прискорювачі.

Об'єкт дослідження: плазмово-діелектричний хвилевід як основа плазмово-діелектричного кільватерного прискорювача (ПДКП) з різними модифікаціями прискорювальної структури.

Предмет дослідження: механізми збудження кільватерних полів у плазмово-діелектричних структурах згустками заряджених частинок та послідовностями згустків заряджених частинок. Спектри кільватерного поля в ПДКП при зміні щільності плазми. Лінійний (overdense) та сильно нелінійний (blowout, underdense) режими збудження кільватерних полів у ПДКП. Динаміка прискорюваного згустку в ПДКП.

Методи дослідження. Проведено аналітичні дослідження руху згустків і окремих частинок з використанням рівняння Максвелла, прямого і зворотного перетворення Фур'є, теорії функції комплексних змінних. За допомогою коду ХООРІС виконано моделювання. Проведено аналіз результатів числових розрахунків та вихідних даних комп'ютерного моделювання. Виконано числові розрахунки із застосуванням методу розв'язання диференціальних рівнянь Рунге-Кутти 4-го порядку. Було застосовано власний авторський код і змодельовано рух частинок.

Наукова новизна отриманих результатів. До теперішнього часу кільватерні поля у плазмово-діелектричних структурах вивчалися лише у випадку замагніченої плазми. Часто в експериментах використовують релятивістські пучки, яким властива відносна стабільність під час транспортування у хвилеводі, тобто поперечні сили, за рахунок релятивістського фактору сильно ослаблені. Цей факт робить наявність зовнішніх магнітних фокуруючих полів необов'язковою, що в свою чергу призводить до можливості вважати плазму ізотропною.

Здобуті результати дозволять обґрунтувати ряд теоретичних аспектів, а також можуть стати основою для проведення нових експериментів та інтерпретації деяких раніше отриманих експериментальних фактів стосовно генерації інтенсивних електромагнітних полів в обмежених хвилевідних структурах.

- Вперше побудовано лінійну теорію збудження кільватерних полів у гібридних плазмово-діелектричних прискорювальних структурах для ізотропної плазми.
- Вперше виявлена і досліджена принципова можливість отримання і налаштування таких поздовжніх положень тестового згустку щодо ведучого згустку, при яких можна забезпечити прискорення згустку заряджених частинок, що супроводжуватиметься їх одночасним радіальним фокусуванням.
- Вперше досліджено вплив власного кулонівського поля згустку на поперечну динаміку частинок прискорюваного пучка у плазмово-діелектричній структурі. Зі збільшенням енергії згустку вплив власного квазістатичного поля згустку зменшується як і в інших прискорювальних структурах.
- Вперше досліджено можливість збільшення амплітуди кільватерного поля у плазмово-діелектричному кільватерному прискорювачі за допомогою підстроювання власної частоти і частоти інжектування згустків за

допомогою зміни внутрішнього чи зовнішнього діаметрів діелектричної вставки.

- Вперше проведено числове моделювання збудження кільватерних полів у плазмово-діелектричній структурі.
- Вперше проведено числове моделювання динаміки прискорюваного згустку в плазмово-діелектричному кільватерному прискорювачі.
- Вперше досліджено вплив власного початкового емітанса згустка на його динаміку.
- Запропоновано принципово нову схему транспортування прискорюваних згустків за допомогою секцій плазмово-діелектричних кільватерних прискорювачів, розділених вакуумними вставками.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дисертаційної роботи можуть бути рекомендовані для використання в Slac National Accelerator Laboratory (USA, Menlo Park, CA), Argonne National Laboratory (USA, Argonne, IL), Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна (м. Харків), Науковому фізико-технологічному центрі Міністерства освіти і науки України та НАН України (м. Харків) Київському національному університеті імені Т. Шевченка (м. Київ), Національному науковому центрі “Харківський фізико-технічний інститут” (м. Харків), Інституті ядерних досліджень НАН України (м. Київ), Інституті радіофізики і електроніки НАН України (м. Харків), Інституті фізики НАН України (м. Київ) та інших організаціях.

Результати проведених досліджень дозволять розширити, поглибити і узагальнити уявлення про складний комплекс процесів, що відбуваються при збудженні електромагнітних полів у плазмово-діелектричних структурах згустками заряджених частинок, інжектованих ззовні. Отримані результати дозволять строго обґрунтувати низку теоретичних аспектів, а також є основою для постановки нових експериментів та інтерпретації деяких експериментальних фактів, які було отримано раніше, що стосуються генерації інтенсивних електромагнітних полів в обмежених хвилевідних структурах.

Результати робіт, представлених у дисертаційній роботі, мають важливе практичне значення для розвитку альтернативних методів прискорення заряджених частинок. Ці результати можуть бути використані при розробці та побудові макетів прискорювальних секцій плазмово-діелектричних кільватерних прискорювачів, а також при розробці потужних джерел надвисокочастотних коливань.

На підставі отриманих результатів проводиться серія експериментів у ННЦ ХФТІ.

Особистий внесок здобувача. Посилання в даному пункті відповідають переліку праць, включених до дисертації. У всіх роботах, опублікованих за темою дисертації, здобувач брав вирішальну участь у постановці задач, проведенні аналітичних та числових розрахунків, написанні тексту статей.

У статті [1] особистий внесок здобувача полягає в отриманні аналітичних виразів для кільватерних полів, що збуджуються у плазмово-діелектричному хвилеводі нескінченно тонким кільцевим згустком, у проведенні числових розрахунків і побудові графіків залежності власних частот

діелектричної структури від щільності плазми та графіків, що показують характерні розподіли поздовжніх і поперечних профілів сил, що діють на прискорюваний згусток, обговоренні результатів та написанні тексту статті.

Для статті [2] здобувач здобув формули, що описують кільватерні поля, збуджувані у плазмово-діелектричному хвилеводі електронним згустком кінцевих розмірів, провів числові розрахунки кільватерних полів для плазми різної щільності. Було проведено аналіз поведінки сил, що діють на прискорюваний згусток у такій структурі, і побудовано графіки, що показують їх характерні розподіли для вибраних рівнів щільності плазми.

Особистий внесок здобувача в статті [3] полягає у виведенні аналітичних виразів для кільватерних полів і сил, що діють на тестовий згусток в наближенні лінійної плазми, у проведенні числових розрахунків кільватерних полів і сил, що діють на тестовий згусток для лінійного (overdense) режиму прискорення, у аналізі PIC-моделювання, обговоренні результатів PIC-моделювання, порівнянні результатів PIC-моделювання і числових розрахунків за аналітичними формулами, а також у побудові графіків.

У статті [4] особистий внесок здобувача полягає у виведенні аналітичних виразів з урахуванням власних квазістатичних полів згустку, у проведенні числових розрахунків для сил, що діють на тестовий згусток, у побудові графіків для власних квазістатичних полів згустку та характерних розподілів сил, що діють на тестовий згусток у такій структурі, а також графіка, що демонструє поведінку прискорюваного пучка під дією кільватерного поля.

У статті [5] особистий внесок здобувача полягає у написанні оригінального коду на C++ для тестування результатів моделювання, в якому використовувалися методи математичної фізики, зокрема метод розв'язання диференціальних рівнянь Рунге-Кутти 4го порядку, а також в обговоренні результатів, написанні статті.

Особистий внесок здобувача в статті [6] полягає в отриманні аналітичних виразів для проведення розрахунків і побудови графіків. Числові розрахунки були проведені для параметрів, аналогічних параметрам установки "Алмаз-2". За допомогою числових результатів були побудовані графіки залежності амплітуди кільватерних полів від щільності плазми і графіки, що демонструють поведінку сил, які діють на прискорюваний згусток у кільватерному полі, і зміну їх поведінки залежно від щільності плазми.

У статті [7] особистий внесок здобувача полягає у постановці задачі, виведенні аналітичних виразів, що описують збудження кільватерних полів у плазмово-діелектричній структурі серією згустків кінцевої довжини, у проведенні числових розрахунків, необхідних для побудови графіків, а також у побудові графіків залежності амплітуди кільватерного поля від щільності плазми для різних довжин драйверної послідовності і обговоренні результатів.

Для статті [8] здобувачем були виконані аналітичні розрахунки, що дозволяють описати рух згустку заряджених частинок під дією кільватерних полів у плазмово-діелектричній структурі з урахуванням початкового емітансу прискорюваного пучка. Було написано оригінальний код на C++ опису поведінки згустків, були побудовані і проаналізовані графіки залежності поведінки обвідної згустку, прискорюваного кільватерними полями у плазмово-діелектричній структурі для різних значень емітансу.

У статті [9] особистий внесок здобувача полягає у виведенні аналітичних виразів для кільватерних полів, які були використані при проведенні числових розрахунків поведінки прискорюваного згустку у плазмово-діелектричному кільватерному прискорювачі та у побудові графіків залежності траєкторій крайової частки від величини і наявності початкового емітансу.

Особистий внесок здобувача в статті [10] полягає у виведенні аналітичних виразів, необхідних для проведення числових розрахунків і побудови графіків, у проведенні числових розрахунків, побудові графіків та проведенні аналізу отриманих результатів.

Стаття [11] присвячена дослідженню фокусування електронних згустків у плазмово-діелектричній прямокутній сповільнювальній структурі. Особистим внеском здобувача є участь у постановці задачі, виведення аналітичних виразів, участь у PIC-моделюванні, аналіз результатів моделювання й аналітичного прогнозу, участь у обговореннях.

Апробація результатів дисертації. Матеріали на яких побудовано дисертацію доповідалися на профільних конференціях:

1. International Conference of Students and Young Scientists in Theoretical and Experimental Physics "Heureka2012"(Lviv, Ukraine)
2. International Particle Acceleration Conference (IPAC'12) (New Orleans, Louisiana, USA)
3. XXIII Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2012)(Peterhof, St. Petersburg, Russia)
4. X Конференція з фізики високих енергій, ядерної фізики і прискорювачів - 2012 (Харків, Україна)
5. 4th International Particle Accelerator Conference (IPAC'13) (Shanghai, China)
6. 1st European Advanced Accelerator Concepts Workshop (EAAC 2013) (La Biodola, Isola d'Elba, Italy)
7. XII International Workshop "Plasma Electronics and New Methods of Acceleration"2013 (Kharkiv, Ukraine)
8. The 41st IEEE International Conference on Plasma Science and the 20th International Conference on High-Power Particle Beams (ICOPS/BEAMS 2014) (Washington DC, USA)
9. 16th Advanced Accelerator Concepts Workshop, (AAC 2014) (San Jose, California, USA)
10. 9th International Workshop «Strong Microwaves and Terahertz waves: sources and applications» (Nizhny Novgorod, Russia)
11. International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion 2014 (Kharkiv, Ukraine)
12. 2nd European Advanced Accelerator Concepts Workshop (EAAC 2015) (La Biodola, Isola d'Elba, Italy)

13. XXIV International Workshop on Charged Particle Accelerators 2015 (Kharkiv, Ukraine)
14. Всеукраїнська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу - 2015 (Київ, Україна)
15. International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion 2016 (Kharkiv, Ukraine)

Здобувач особисто приймав участь і доповідав на конференціях 1,3,4,5,7,8,11,12,13,15.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано в 26 наукових роботах. А саме, в 11 статтях у спеціалізованих фахових наукових виданнях [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11], які включено до міжнародних наукометричних баз – Scopus, Web of Science, з яких 3 статті у спеціалізованих наукових виданнях іноземних держав [4, 8, 10], а також у 15 роботах у матеріалах і тезах доповідей на наукових конференціях [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27]. Статті [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11] задовольняють вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України до публікацій, на яких ґрунтується дисертація.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, огляду літератури, п'яти розділів, висновків і списку використаних літературних джерел. Повний обсяг дисертації становить 142 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дослідження прискорення згустків заряджених частинок за допомогою кільватерних полів, що збуджуються у плазмово-діелектричних структурах драйверними згустками або їхніми послідовностями. Сформульовано мету та основні завдання досліджень, подано анотацію основних положень роботи. Приведено список апробацій матеріалів дисертації, описано особистий внесок здобувача у дослідження, що увійшли у дисертаційну роботу.

У **першому розділі** подано огляд літератури за темою дисертації. Наведено інформацію про нові методи прискорення заряджених частинок. Детально розкрито актуальність дисертаційної роботи, показано взаємозв'язок цих досліджень та їхнє значення для світової фізичної спільноти.

У **другому розділі** наведено результати досліджень лінійної теорії збудження кільватерних полів одиночним згустком у плазмово-діелектричному хвилеводі (ПДХ). ПДХ представляє собою діелектричну трубку з внутрішнім радіусом a та зовнішнім радіусом b , зовні діелектрик вкрито металом, а весь простір всередині заповнює плазма. Уздовж осі хвилеводу рухається згусток. Було продемонстровано методику отримання аналітичних виразів, які описують кільватерні поля, збуджувані у плазмово-діелектричному хвилеводі. Кільватерне поле, що збуджується, можна описати за допомогою системи рівнянь Максвелла з урахуванням таких граничних

умов:

$$\begin{aligned} E_{z\omega}(r=0) < \infty, \quad E_{z\omega}(r=b) = 0, \quad E_{z\omega}(r=r_0-0) = E_{z\omega}(r=r_0+0), \\ E_{z\omega}(r=a-0) = E_{z\omega}(r=a+0), \quad H_{\varphi\omega}(r=a-0) = H_{\varphi\omega}(r=a+0), \\ H_{\varphi\omega}(r=r_0+0) - H_{\varphi\omega}(r=r_0-0) = \frac{Q}{\pi r_0} \exp(i\omega t_0) \end{aligned} \quad (1)$$

Розв'язавши рівняння Максвелла з цими граничними умовами, отримано аналітичні вирази для компонентів кільватерного поля. Виконавши зворотне перетворення Фур'є і обчисливши інтеграли за допомогою теорії лишків, отримано наступні аналітичні вирази для кільватерного поля згустку, що має форму нескінченно малого кільця радіуса r_0 :

$$E_z(r_0, t_0, r, \tau) = -\frac{2Q}{a^2} \Theta(\tau - t_0) \left\{ \begin{aligned} & k_p^2 a^2 \frac{I_0(k_p r_<)}{I_0(k_p a)} \Delta_0(k_p a, k_p r_>) \times \\ & \times \cos \omega_p(\tau - t_0) + \\ & + \frac{2a}{v_0} \sum_s \frac{I_0(\kappa_p^s r_<)}{I_0(\kappa_p^s a)} \frac{I_0(\kappa_p^s r_>)}{I_0(\kappa_p^s a)} \times \\ & \times \frac{\cos \omega_s(\tau - t_0)}{D'(\omega_s)}, \quad r < a \end{aligned} \right. ; \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{2a}{v_0} \sum_s \frac{I_0(\kappa_p^s r_0)}{I_0(\kappa_p^s a)} \frac{F_0(\kappa_d^s r, \kappa_d^s b)}{F_0(\kappa_d^s a, \kappa_d^s b)} \times \\ & \times \frac{\cos \omega_s(\tau - t_0)}{D'(\omega_s)}, \quad a \leq r \leq b \end{aligned} \right.$$

$$E_r(r_0, t_0, r, \tau) = \frac{2Q}{a^2} \Theta(\tau - t_0) \left\{ \begin{aligned} & k_p a^2 \frac{d}{dr} \left(\frac{I_0(k_p r_<) \Delta_0(k_p a, k_p r_>)}{I_0(k_p a)} \right) \times \\ & \times \sin \omega_p(\tau - t_0) + \\ & + \frac{2a}{v_0} \sum_s \frac{I_1(\kappa_p^s r_<)}{I_0(\kappa_p^s a)} \frac{I_0(\kappa_p^s r_>)}{I_0(\kappa_p^s a)} \times \\ & \times \frac{\sin \omega_s(\tau - t_0)}{D'(\omega_s) \sqrt{1 - \beta_0^2 \varepsilon_p(\omega_s)}}, \quad r < a \end{aligned} \right. ;$$

$$\left\{ \begin{aligned} & - \frac{2a}{v_0 \sqrt{\beta_0^2 \varepsilon_d - 1}} \sum_s \frac{I_0(\kappa_p^s r_0)}{I_0(\kappa_p^s a)} \frac{F_1(\kappa_d^s r, \kappa_d^s b)}{F_0(\kappa_d^s a, \kappa_d^s b)} \times \\ & \times \frac{\sin \omega_s(\tau - t_0)}{D'(\omega_s)}, \quad r > a \end{aligned} \right. \quad (3)$$

$$H_\varphi(r_0, t_0, r, \tau) = \frac{4Q}{ac} \Theta(\tau - t_0) \begin{cases} \sum_s \frac{\varepsilon_p(\omega_s)}{\sqrt{1 - \beta_0^2 \varepsilon_p(\omega_s)}} \frac{I_0(\kappa_p^s r_0)}{I_0(\kappa_p^s a)} \frac{I_1(\kappa_p^s r)}{I_0(\kappa_p^s a)} \times \\ \times \frac{\sin \omega_s(\tau - t_0)}{D'(\omega_s)}, \quad r < a \\ - \frac{4\varepsilon_d}{\sqrt{\beta_0^2 \varepsilon_d - 1}} \sum_s \frac{I_0(\kappa_p^s r_0)}{I_0(\kappa_p^s a)} \frac{F_1(\kappa_d^s r, \kappa_d^s b)}{F_0(\kappa_d^s a, \kappa_d^s b)} \times \\ \times \frac{\sin \omega_s(\tau - t_0)}{D'(\omega_s)}, \quad a \leq r \leq b \end{cases}, \quad (4)$$

де E_z, E_r, H_φ - компоненти кильватерного поля, $\Theta(\chi)$ - функція Хевісайда, $k_p = \omega_p/v_0$, $\kappa_p^s = \kappa_p(\omega = \omega_s)$, $\kappa_d^s = \kappa_d(\omega = \omega_s)$, $D'(\omega_s) = \left. \frac{dD(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_s}$, а власні частоти ω_s визначають з розв'язку дисперсійного рівняння:

$$D(\omega_s) = 0. \quad (5)$$

У виразах (2) - (3) введено позначення: $\Delta_p = \frac{Q\omega}{\pi c^2} \frac{1 - \beta_0^2 \varepsilon_p(\omega)}{\beta_0^2 \varepsilon_p(\omega)}$, $I_0(x)$, $I_1(x)$, $K_0(x)$, $K_1(x)$ - модифіковані функції Бесселя і Макдональда нульового і першого порядку, відповідно; $F_0(x, y) = J_0(x)N_0(y) - N_0(x)J_0(y)$, $F_1(x, y) = -J_1(x)N_0(y) + N_1(x)J_0(y)$, $J_0(x)$, $J_1(x)$, $N_0(x)$, $N_1(x)$ - функції Бесселя і Неймана нульового і першого порядку, відповідно;

$$\kappa_p^2 = \frac{\omega^2}{v_0^2} (1 - \beta_0^2 \varepsilon_p(\omega)), \quad \kappa_d^2 = \frac{\omega^2}{v_0^2} (\beta_0^2 \varepsilon_d - 1), \quad \gamma_d = \varepsilon_d / \sqrt{\beta_0^2 \varepsilon_d - 1}.$$

Знак $< (>)$ означає найменше (найбільше) зі значень r і r_0 . Дисперсійна функція $D(\omega)$, що входить до знаменників виразів (2) - (3), має вигляд:

$$D(\omega) = \frac{\varepsilon_p(\omega)}{\sqrt{1 - \beta_0^2 \varepsilon_p(\omega)}} \frac{I_1(\kappa_p a)}{I_0(\kappa_p a)} + \gamma_d \frac{F_1(\kappa_d a, \kappa_d b)}{F_0(\kappa_d a, \kappa_d b)}. \quad (6)$$

Перші доданки у виразах для електричного поля (2) - (3) описують поле ленгмюрівських коливань ($\varepsilon_p = 0$, $\omega = \omega_p$), воно локалізоване в каналі транспортування, на його межі поле дорівнює нулю і не залежить від параметрів діелектричної структури. Ці доданки в (2) - (3) збігаються з виразами для електричних полів ленгмюрівських коливань в ізотропному плазмовому хвилеводі, якщо в цих виразах спрямувати радіус плазмового циліндра до нескінченності $a \rightarrow \infty$, ми перейдемо до виразів для кильватерних полів у необмеженій плазмі.

Решта доданків в (2) - (3) описують електричне поле власних коливань діелектричної структури (для простоти назовемо їх діелектричними). Відзначимо, що відповідно до (4) магнітне поле кильватерної хвилі не містить поля ленгмюрівських коливань.

Також в цьому розділі наведені результати числових розрахунків сил, які діють на тестову частинку. Виявлена принципова можливість одночасного

прискорення та фокусування прискорюваного згустку. Знайдені оптимальні параметри для демонстрації цього ефекту.

У **третьому розділі** розглянуто вплив власних квазістатичних полів згустку на збудження кільватерних полів у плазмово-діелектричному хвилеводі. Наведено процедуру виводу аналітичних виразів, що описують такий вплив. Представлено в явному вигляді аналітичні вирази, які описують кільватерні поля, що збуджуються у плазмово-діелектричному хвилеводі згустком заряджених частинок, з урахуванням власних квазістатичних полів згустку. Виконано числові розрахунки для параметрів, аналогічних установці "Алмаз-2" (ННЦ ХФТІ). Проаналізовано вплив власного квазістатичного поля згустку на радіальну динаміку частинок згустку залежно від енергії згустку (див мал. 1 - 2).

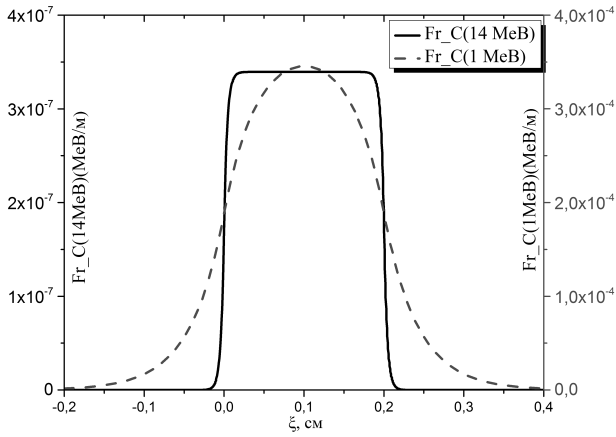


Рис. 1: Поздовжній профіль кулонівської компоненти поперечної сили для різних енергій. Суцільна лінія (ліва шкала) - 14 MeV, пунктирна лінія (права шкала) - 1 MeV

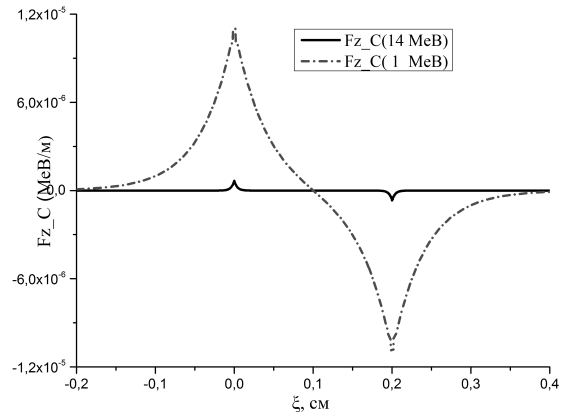


Рис. 2: Поздовжній профіль кулонівської компоненти поздовжньої сили для різних енергій. Суцільна лінія - 14 MeV, пунктирна лінія - 1 MeV

Наведено співвідношення сумарних сил та їх квазістатичних компонент, з якого випливає, в наших умовах в плазмово-діелектричних структурах дією кулонових полів можна знехтувати.

В **четвертому розділі** наведені результати числового моделювання процесу збудження кільватерних полів у плазмово-діелектричному хвилеводі.

Розглянуто два принципово різних режими збудження кільватерних полів – лінійний (overdense regime) та сильно нелінійний (blowout, underdense regime). наведено аналітичні вирази для лінійного режиму, результати моделювання кодом "An Object-Oriented Electromagnetic Particle-In-Cell Code" *ХООРІС* для лінійного (рис.3) та для сильно нелінійного (рис.4) режимів. Проведено порівняльний аналіз результатів числових розрахунків та результатів моделювання.

Показано, що результати числового моделювання (наприклад амплітуди кільватерних полів) можуть бути співвіднесені з аналітичними виразами, отриманими у попередніх розділах. Встановлено й продемонстровано, що для того, щоб розглядати лінійний режим збудження кільватерних полів, вико-

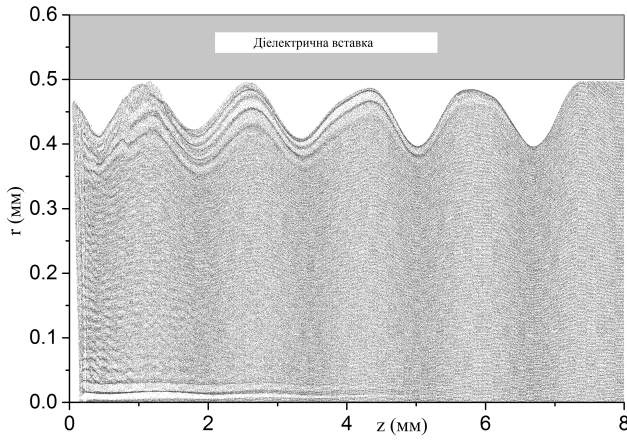


Рис. 3: Конфігурація простору (z, r) плазмових електронів для характерного часу. Лінійний режим.

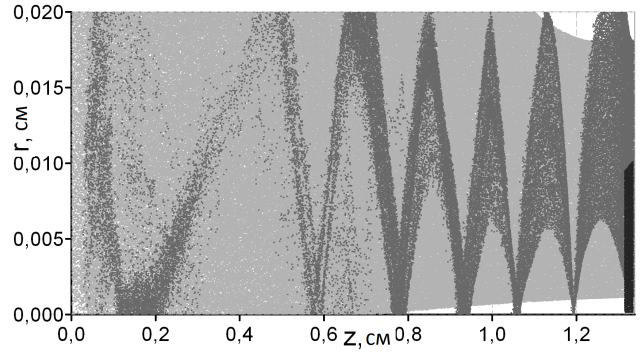


Рис. 4: Конфігурація простору (z, r) плазмових електронів (темна область) та плазмових іонів (світла область) для характерного часу. Сильно нелінійний режим.

нання сильної нерівності $n_b \ll n_p$ не є обов'язковим, достатньо виконання простої нерівності $n_b < n_p$. Також показано, що фокусуюча сила в blowout-режимі залежить не лише від співвідношення n_b/n_p , але й від вихідної кількості електронів плазми.

У **п'ятому розділі** розглянуто ситуацію, коли кільватерне поле збуджується не одиничним згустком, а серією згустків. Висока ефективність діелектричного кільватерного прискорювача (ДКП) досягається за рахунок деякої втрати у величині градієнта прискорення, яка, тим не менш, залишається привабливою для альтернативних прискорювачів.

Автором встановлено, що як альтернативу квадрупольному фокусуванню в ДКП можна використовувати плазму, що заповнюватиме дрейфовий канал діелектричної структури [8]. Властивості плазми, що призводять до фокусування ведучого згустку, вже відомі [9], [10], але комбінація плазми і діелектричної структури призводить до можливості фокусування й прискорення згустку [8]. У такий плазмово-діелектричній структурі в режимі лінійної плазми фокусування забезпечує ленгмюрівська хвиля, а прискорення – модифікована власна хвиля діелектричної структури (для простоти, діелектрична хвиля).

У цьому розділі також представлено результати дослідження залежності амплітуди кільватерного поля у діелектричній структурі від густини плазми. Показано, що зі збільшенням густини плазми резонансна частота першої радіальної моди діелектричної хвилі зростає, і якщо частоту слідування згустків зафіксувати, то синхронність впливу згустків на структуру буде погіршуватись, а амплітуда повного кільватерного поля зменшуватиметься. Під «повним полем» ми розуміємо суму поля плазмової та діелектричної хвиль.

Для запобігання порушення синхронності в четвертому розділі запропоновано змінювати розміри діелектричної структури так, щоб резонансна частота першої моди діелектричної хвилі дорівнювала плазмовій частоті, а частота слідування згустків була підібрана під цю частоту. Було показано можливість тонкого налаштування двома шляхами: за рахунок внутрішнього радіуса діелектричної структури та за рахунок її зовнішнього радіуса.

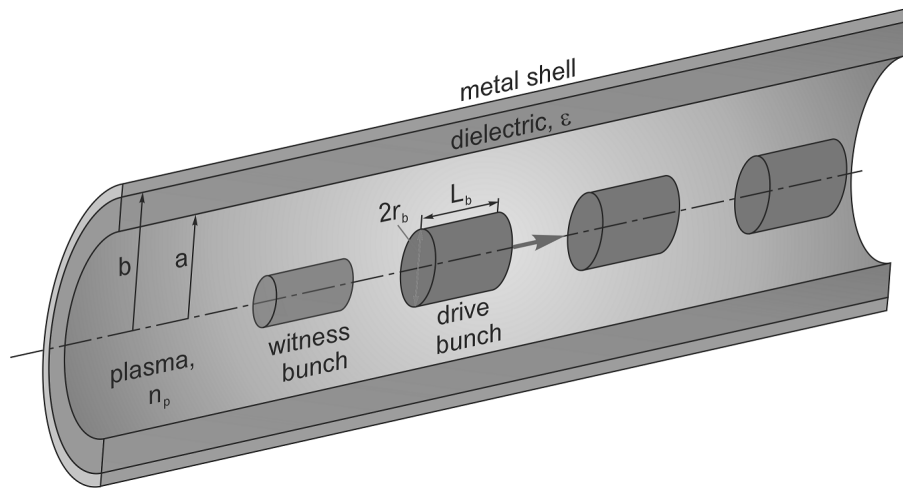


Рис. 5: Схема геометрії плазмово-діелектричного кільватерного прискорювача.

У випадку підгонки внутрішнім радіусом діелектричної вставки інтервал густин плазми, при яких діелектричні хвилі роблять істотний внесок до сумарного поля, знаходиться при низьких густинах плазми і далеко від оптимального, при якому досягається максимум загального кільватерного поля.

У випадку підгонки зміною зовнішнього радіуса цей інтервал стає ширшим і внесок діелектричної хвилі стає відчутним навіть біля максимуму сумарного кільватерного поля.

У **шостому розділі** наведено результати числового моделювання динаміки прискорюваного згустку у плазмово-діелектричному хвилеводі.

Представлено результати досліджень впливу початкового еміттансу прискорюваного згустку на його фокусування.

На рис. 6 показано поведінку граничних частинок прискорюваних згустків у плазмово-діелектричному кільватерному прискорювачі за різних значень початкового еміттансу. Видно, що при малих значеннях початкового еміттансу поперечні розміри згустку дуже малі. Це може призвести до над сильного фокусування в плазмі, що в свою чергу небезпечно можливим переходом до нелінійного ("blowout") режиму.

У цьому розділі також наведено принципово нову схему транспортування електронних згустків у діелектричному хвилеводі за допомогою плазмових проміжків.

Загальне представлення про таку структуру можна отримати з рис. 7.

Драйверний згусток рухається крізь прискорювальну систему, збуджуючи кільватерні поля у кожній з ПДКП-комірок, що прискорюють введений згусток. У вакуумному проміжку на прискорюваний згусток ніякі сили не діють. В такий спосіб ми можемо позбутися надмірного фокусування в плазмі.

На рис. 8-11 показано характеристики пробних частинок під час транспортування через ПДКП.

dz - відстань на яку зсувається тестова частинка відносно свого початкового положення під час прискорення.

З малюнку 8 добре видно що площина фокусування знаходиться за межами плазмово-діелектричних комірок (ПДК), таким чином ми позбавились небезпеки переходу до нелінійного режиму в наслідок надмірного перефокусування в плазмі. Після проходження другої ПДК згусток стає ламінарним,

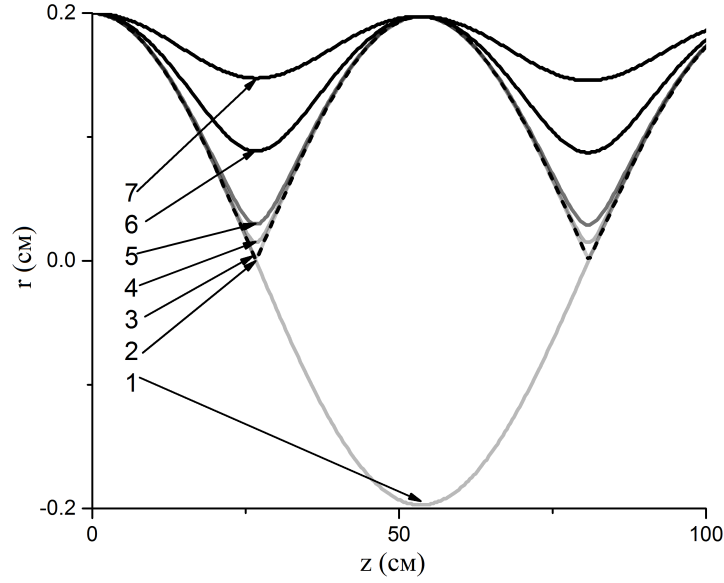


Рис. 6: Обгортка згустку при різних значеннях початкового емітансу. Лінія 1 відповідає початковому емітансу $emit_n = 0$, лінія 2 відповідає початковому емітансу $emit_n = 1 \cdot E^{-6}$, лінія 3 відповідає початковому емітансу $emit_n = 1 \cdot E^{-3}$, лінія 4 відповідає початковому емітансу $emit_n = 5 \cdot E^{-3}$, лінія 5 відповідає початковому емітансу $emit_n = 1 \cdot E^{-2}$, лінія 6 відповідає початковому емітансу $emit_n = 3 \cdot E^{-2}$, лінія 7 відповідає початковому емітансу $emit_n = 5 \cdot E^{-2}$,

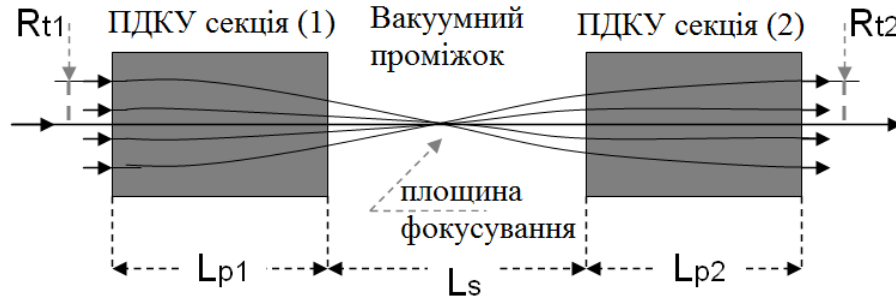


Рис. 7: Схематичне зображення пари плазмово-діелектричних структур, що їх використовують як елементи фокусування при транспортуванні електронного згустку.

що дозволяє говорити про використання такої системи для транспортування згустків заряджених частинок.

На малюнку 11 добре видно, що найбільший приріст енергії відчували частинки, які найменш зсувалися відносно початкового положення. Отже можна сказати, що найбільший приріст енергії відчували частинки близькі до осі згустку.

Таким чином, проведене моделювання показало можливість використання такої системи плазмово-діелектричних комірок для транспортування згустків заряджених частинок.

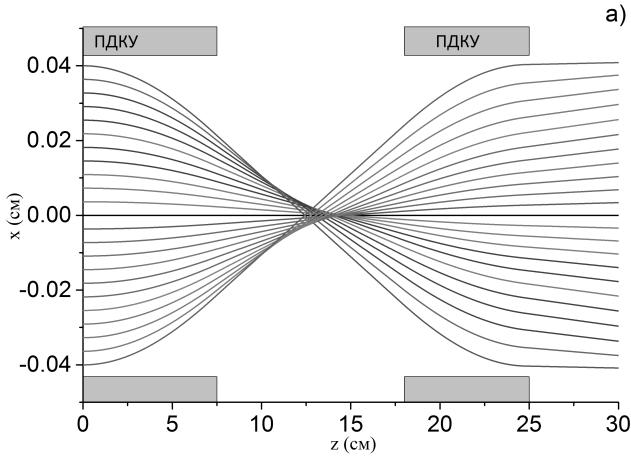


Рис. 8: Поперечна динаміка.

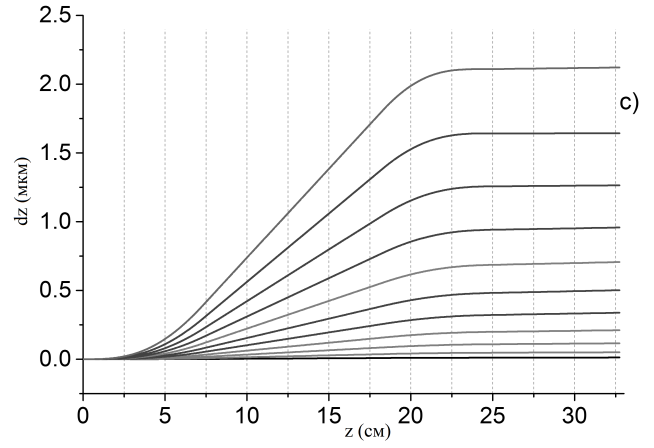


Рис. 9: Зсув відносно початкового положення.

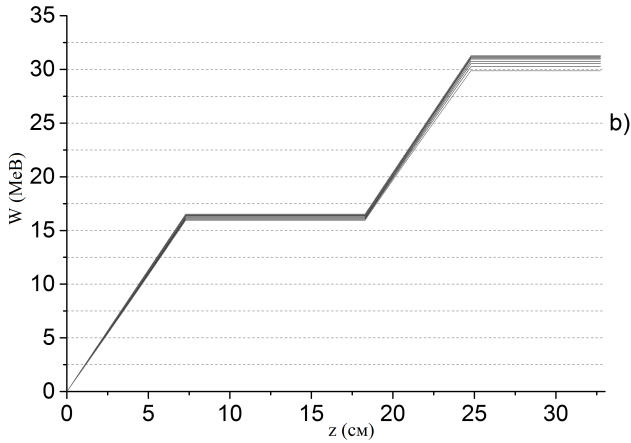


Рис. 10: Приріст енергії.

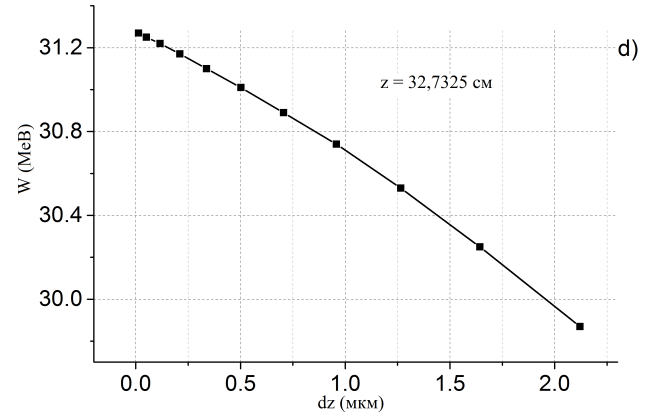


Рис. 11: Залежність приросту енергії від зсуву відносно початкового положення.

У **висновках** стисло наведено результати дисертаційного дослідження за темою «Прискорення заряджених частинок кільватерними полями в плазово-діелектричних структурах».

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано важливу теоретичну і прикладну задачу прискорення і транспортування згустків заряджених частинок у плазово-діелектричних кільватерних структурах. Для забезпечення одночасного фокусування прискорюваних і драйверних згустків вперше запропоновано використовувати гібридну структуру, що об'єднує переваги власне діелектричних і власне плазових кільватерних структур. Шляхом аналітичних досліджень і числового моделювання доведено, що проблему стабільності прискорених згустків можна успішно вирішити шляхом використання плазово-діелектричних уповільнюючих структур. Основні результати, здобуті в дисертаційній роботі, полягають у наступному:

1. Вперше проаналізовано електромагнітні властивості плазово-діелектричних кільватерних прискорювальних структур (ПДКП-

структур) з дрейфовим каналом, заповненим ізотропною плазмою, збуджуваних електронними згустками. Показано, що у лінійному режимі електромагнітне поле складається з трьох складових – поля діелектричних хвиль, поля ленгмюрівської хвилі і квазістатичного поля згустків.

2. У дисертаційній роботі досліджено поздовжню і поперечну структуру електромагнітного поля в ПДКП-структурі. Вперше показано, що поперечна сила, що діє на електрони ведучого згустку, завжди є фокусуючою (в режимі одиночного ведучого згустку), а поперечна сила, що діє на частинки прискорюваного згустку, може бути фокусуючою. Можливість одночасного фокусування і прискорення не залежить від знаку заряду прискорених частинок, тобто такий режим можливий як для електронних, так і для позитронних згустків.
3. Фокусуюча сила виникає внаслідок збудження ленгмюрівської хвилі, що робить переважний внесок до поперечної сили. У той самий час внесок ленгмюрівської хвилі до поздовжньої сили, що прискорює тестові частинки, є незначним. Поздовжня сила, здебільшого, визначається хвилями, які відповідають власним модам діелектричного хвилеводу. Зазначені властивості результуючого кільватерного поля, що збуджуються у діелектричному хвилеводі з ізотропною плазмою, помітно проявляються лише в певному діапазоні щільності плазми, що залежить від робочого діапазону ПДКП. При цьому ленгмюрівська частота має завжди бути меншою за частоти діелектричних мод.
4. Власне квазістатичне поле згустків локалізовано поблизу згустків. Зі збільшенням щільності плазми і збільшенням енергії згустку вплив власного квазістатичного поля згустку зменшується. Методом числових розрахунків показано, що для можливих макетів ПДКП квазістатичним полем можна знехтувати при розрахунку динаміки згустків починаючи вже з енергії згустку ~ 15 MeV.
5. Вперше показано залежність амплітуди кільватерного поля у багатобанчевому ПДКП від густини плазми, яка знаходиться в певному інтервалі навколо оптимальної. Оптимальна густина плазми визначається з умови максимуму плазмової хвилі $k_p a \sim 2$ (a — радіус дрейфового каналу). При цьому необхідно підлаштовувати частоту інжектування згустків і власні частоти структури. Найкращий варіант підстроювання власних частот - зміна зовнішнього діаметра діелектричної вставки, при якому інтервал щільності плазми ширше і діелектричні хвилі роблять помітний внесок до сумарного кільватерного поля, що дозволяє підбирати найкращий матеріал для діелектричної вставки в залежності від конкретних розмірів структури.
6. Числове моделювання методом частинка-в-комірці (XOOPIC) підтвердило аналітичні результати, отримані в лінійному режимі ("underdense plasma") за умови $n_p/n_b > 3$. Фокусуючі властивості плазми зберігаються, а втрати електронів плазми на стінки діелектричної трубки не перевищують 8 % в THz діапазоні ПДКП. Числове моделювання нелінійного

режиму ("blowout") показало, що фокусуюча сила залежить не тільки від відношення n_b/n_p , але і від початкової кількості електронів плазми.

7. Запропоновано принципово новий спосіб уникнення перефокусування згустків в ПДКП. Суть цього способу полягає у розбитті суцільної ПДКП-структури вакуумними проміжками. Числові розрахунки, виконані для частинок прискорюваного згустку, показали, що реалізація запропонованого способу дозволяє уникнути надмірного стискання прискорюваного згустку в плазмі.

Список опублікованих праць за темою дисертації

- [1] Kniaziev, R. R. Focusing of electron bunches by wake fields in a plasma-dielectric waveguide (rus.) / R. R. Kniaziev, G. V. Sotnikov // The Journal of Kharkiv National University. Physical series «Nuclei, Particles, Fields». — 2012. — Vol. 54, no. 2. — P. 64–68. — [http://nuclear.univer.kharkov.ua/lib/1001.2\(54\).12_p64-68.pdf](http://nuclear.univer.kharkov.ua/lib/1001.2(54).12_p64-68.pdf).
- [2] Князєв, Р. Р. Фокусування електронних згустків кильватерними полями, що збуджуються електронним згустком в плазмово-діелектричному хвилеводі. / Р. Р. Князєв, Г. В. Сотніков // Вісник Львівського університету. Серія фізична. — 2012. — Т. 47. — С. 178–190. — http://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/19_47.pdf.
- [3] Focusing of electron and positron bunches in plasma-dielectric wakefield accelerators / R.R. Kniaziev, O.V. Manuilenko, P.I. Markov et al. // Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Electronics and New Methods of Acceleration". — 2013. — Vol. 86, no. 4. — P. 84–89. — http://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2013_4/article.2013_4.84.pdf.
- [4] Analytical and numerical studies of underdense and overdense regimes in plasma-dielectric wakefield accelerators / G. V. Sotnikov, R. R. Kniaziev, O. V. Manuilenko et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2014. — Vol. A740. — P. 124–129. — <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900213014940>.
- [5] Study of wakefields in longitudinally and transversely inhomogeneous rectangular dielectric resonators / P.I. Markov, V.A. Kiselev, R.R. Kniaziev et al. // Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Physics". — 2014. — Vol. 20, no. 6. — P. 97–100. — http://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2014_6/article.2014_6.97.pdf.
- [6] Wakefield spectra in the plasma-dielectric accelerator when changing the plasma density / R.R. Kniaziev, P.I. Markov, I.N. Onishchenko, G.V. Sotnikov // Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Electronics and New Methods of Acceleration". — 2015. — Vol. 98, no. 4. — P. 105–110. — http://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2015_4/article.2015_4.105.pdf.

- [7] Kniaziev, R. R. Transport of bunches in a dielectric wakefield accelerator using an array of plasma cells / R. R. Kniaziev, T. C. Marshall, G. V. Sotnikov // Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations". — 2015. — Vol. 6. — P. 42–46. — http://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2015_6/article_2015_6_42.pdf.
- [8] Kniaziev, R. R. Influence of emittance on transverse dynamics of accelerated bunches in the plasma-dielectric wakefield accelerator / R. R. Kniaziev, G. V. Sotnikov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2016. — Vol. A829. — P. 121–124. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.03.097>.
- [9] Kniaziev, R. R. Influence of emittance on transverse dynamics of the accelerated bunches in plasma-dielectric wake field accelerator / R. R. Kniaziev // East European Journal of Physics. — 2015. — Vol. 2, no. 2. — P. 44–50. — http://eejp.univer.kharkov.ua/Biblio/2015/EEJP_2_2/22p44-50.pdf.
- [10] Князев, Р. Генерация кильватерных полей при заполнении диэлектрической структуры плазмой / Р.Р. Князев, И.Н. Онищенко, Г.В. Сотников // Журнал технической физики. — 2016. — Т. 86, № 4. — С. 34–39. — <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/42962>.
- [11] Focusing of electron bunches in the plasma-dielectric rectangular slowing-down structure / P.I. Markov, R.R. Kniaziev, I.N. Onishchenko, G.V. Sotnikov // Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations". — 2016. — Vol. 103, no. 3. — P. 57–61. — http://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2016_3/article_2016_3_57.pdf.
- [12] Kniaziev, R. R. Focusing of accelerated particles by wakefields of a drive bunch in a plasma-dielectric waveguide / R. R. Kniaziev, G. V. Sotnikov // In Proc. IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA. — 2012. — P. 2723–2725. — <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2012/papers/weppp003.pdf>.
- [13] Kniaziev, R. R. Excitation of the focusing wakefields by a relativistic bunch in isotropic capillary discharge plasma / R. R. Kniaziev, G. V. Sotnikov // In Proc. RuPAC2012, St. Petersburg, Russia. — 2012. — P. 242–244. — <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/rupac2012/papers/moppa001.pdf>.
- [14] Kniaziev, R. R. Quasistatic field influence on bunches focusing by wakefields in the plasma-dielectric waveguide. / R. R. Kniaziev, G. V. Sotnikov // In Proc. IPAC2013, Shanghai, China. — 2013. — P. 1256–1258. — <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2013/papers/tupea055.pdf>.
- [15] Spectra of a wakefield excited by an electron bunch train in a short section of a dielectric waveguide / Galaydych K.V., Markov P.I., Onishchenko I.N. et al. // In Proc. 9th International Workshop «Strong Microwaves and Terahertz waves: sources and applications», Nizhny Novgorod, Russia. — 2014. — P. 73–74.
- [16] Study of wakefields in longitudinally and transversely inhomogeneous rectangular dielectric resonators / P. I. Markov, I. N. Onishchenko,

- R. R. Kniaziev et al. // International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion, Kharkiv, Ukraine. "— 2014. "— P. 95. "— <http://www.kipt.kharkov.ua/ipp/ipp/192.168.210.27/ipp/alushta2014/Book%20of%20abstracts.pdf>.
- [17] Kniaziev, R. R. Transverse dynamics of accelerated bunches in a plasma-dielectric wakefields / R. R. Kniaziev, G. V. Sotnikov // 41st IEEE International Conference on Plasma Science and the 20th International Conference on High-Power Particle Beams, Marriott Wardman Park, Washington DC, USA. "— 2014. "— P. 39.
- [18] Focusing of electron and positron bunches in plasma-dielectric wakefield accelerators / R. R. Kniaziev, O. V. Manuilenko, P.I. Markov et al. // XII INTERNATIONAL WORKSHOP "PLASMA ELECTRONICS AND NEW METHODS OF ACCELERATION", Kharkiv, Ukraine. "— 2013. "— P. 15.
- [19] Князєв, Р. Р. Фокусування електронних згустків кільватерними полями, що збуджуються електронним згустком в плазмово-діелектричному хвилеводі / Р. Р. Князєв, Г. В. Сотніков // МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ СТУДЕНТІВ І МОЛОДИХ НАУКОВЦІВЗ ТЕОРЕТИЧНОЇ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ФІЗИКИ ЕВРИКА-2012, Львів, Україна. — 2012. — С. 8.
- [20] Князев, Р. Р. Возбуждение ускоряющих полей электронным сгустком в плазменно-диэлектрическом волноводе / Р. Р. Князев, Г. В. Сотников // X конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, Харьков, Украина. — 2012. — С. 40. — http://kipt.kharkov.ua/ihepnp_2012_tezis.html.
- [21] Kniaziev, R. R. Quasistatic field influence on bunches focusing by wakefields in the plasma-dielectric waveguide / R. R. Kniaziev, G. V. Sotnikov // In Proc. IPAC2013, Shanghai, China. "— 2013. "— http://ipac13.org/accessory/IPAC13_Abstracts_Brochure_all.pdf.
- [22] Radiation of a wakefield excited by an electron bunch train in a section of dielectric waveguide / R. R. Kniaziev, G. V. Sotnikov, K.V. Galaydych et al. // In Proc. 16th Advanced Accelerator Concepts Workshop, San Jose, California, USA. "— 2014.
- [23] Мульти-банчевий режим збудження кільватерного поля в плазмово-діелектричній структурі / Р. Р. Князєв, Г. В. Сотніков, І. М. Оніщенко та ін. // Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу, Київ, Україна. — 2015. — С. 8. — http://www.kinr.kiev.ua/UCPPCF/2015/ucppcf-2015_program.pdf.
- [24] Kniaziev, R. R. Transport of bunches in dielectric wakefield accelerator using the array of plasma cells / R. R. Kniaziev, G. V. Sotnikov, T. C. Marshall // XXIV International Workshop on Charged Particle Accelerators, Kharkiv, Ukraine. "— 2015. "— P. 17–18.
- [25] Focusing of electron bunches in the plasma and dielectric rectangular slowing-down structure / R. R. Kniaziev, G. V. Sotnikov, P. I. Markov,

- I. N. Onishchenko // XXIV International Workshop on Charged Particle Accelerators, Kharkiv, Ukraine. "— 2015. "— P. 19–20.
- [26] Sotnikov, G. V. Focusing of accelerated particles by wakefields of a drive bunch in a plasma-dielectric waveguide / G. V. Sotnikov, R. R. Kniaziev // In Proc. IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA. "— 2012. "— P. 231.
" — <http://ipac12.org/abstracts-full-IPAC-final.pdf>.
- [27] Kniaziev, R. R. Features of the transverse dynamics of accelerated bunch in the plasma-dielectric wakefield accelerator / R. R. Kniaziev, G. V. Sotnikov // International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion Book of Abstract, Kharkiv, Ukraine. "— 2016. "— P. 102.
" — <http://kipt.kharkov.ua/conferences/ipp/2016/Book%20of%20abstracts.pdf>.

АНОТАЦІЯ

Князєв Р.Р. Прискорення заряджених частинок кільватерними полями в плазмово-діелектричних структурах. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми. – Харківський Національний Університет імені В.Н. Каразіна МОН України, Харків, 2017 р.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню прискорення згустків заряджених частинок в плазмово-діелектричних структурах. Основною метою дослідження є побудова теоретичної бази для використання новітніх методів прискорення.

Представлена схема отримання та отримано аналітичні вирази, що описують кільватерні поля, які збуджуються в плазмово-діелектричному хвилеводі згустком заряджених частинок. Розглянута лінійна теорія збудження кільватерних полів. Показано, що власне квазістатичне поле згустку не впливає на радіальну динаміку згустку при енергіях згустку починаючи з МеВ-ного діапазону.

Розглянута ситуація збудження кільватерних полів послідовністю електронних згустків. Вивчено вплив густини плазми на амплітуду кільватерного поля в діелектричній структурі. Розглянуто залежність спектрів кільватерного поля в плазмово-діелектричній структурі від густини плазми. Проведено числове моделювання збудження кільватерних полів в плазмово-діелектричному хвилеводі для лінійного та для сильно нелінійного режимів збудження кільватерних полів в плазмово-діелектричній структурі.

Побудовано математичну модель, яка описує радіальну динаміку згустку заряджених частинок в плазмово-діелектричному прискорювачі. Проведено числове моделювання динаміки прискорюваного згустку в плазмово-діелектричній структурі.

Враховано вплив початкового емітансу згустку та запропонована нова схема транспортування згустків заряджених частинок в діелектричному кільватерному прискорювачі за допомогою масиву плазмових комірок.

Ключові слова: кільватерне поле, плазма, діелектричний хвилевід, прискорення, згусток заряджених частинок, фокусування, транспортування згустків.

ANNOTATION

Roman R. Kniaziev Accelerating of charged particles by wakefields in the plasma-dielectric structures. The manuscript

Thesis for scientific degree candidate of science in physics and mathematics by theme 01.04.08 – plasma physics. – Kharkiv V. N. Karazin National University Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2017.

Dissertation work is devoted to accelerating bunches of charged particles in plasma-dielectric structures. The main purpose of the study is to construct a theoretical framework for the use of new methods of acceleration.

The scheme for obtaining and analytical expressions describing wakefields that are excited in the plasma-dielectric waveguide bunch of charged particles. Considered the theory of linear excitation wakefields. It is shown that quasi-static field of the bunch does not affect the bunch's radial dynamic at energies since MeV range.

Considered situation wakefield excitation sequence of electron bunches. The effect on the plasma density amplitude of wakefield in the dielectric structure. Considered dependent spectra of wakefield in the plasma-dielectric structures by plasma density.

A numerical simulation of wake fields excitation in the plasma-dielectric waveguide for linear and nonlinear modes for much excitement wakefields in the plasma-dielectric structures.

A mathematical model describing the dynamics of radial bunch of charged particles in plasma-dielectric structure.

A numerical simulation of accelerated bunch dynamics in plasma-dielectric structures.

Included impact emittans of initial bunch and proposed a new scheme bunches of charged particles transportation in the dielectric wakefield accelerator using an array of plasma cells.

Keywords: wakefield, plasma, dielectric waveguide, the acceleration of charged particles bunch, focusing, transportation of the bunches.

АННОТАЦИЯ

Князев Р.Р. Ускорение заряженных частиц кильватерными полями в плазменно-диэлектрических структурах. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 - физика плазмы. - Харьковский Национальный Университет им. В.Н. Каразина МОН Украины, Харьков, 2017 г.

Необходимость перехода от классических методов ускорения к новым, альтернативным методам ускорения уже не является новостью в мировом ускорительном сообществе. Во многих ведущих лабораториях мира ведутся работы по исследованию и разработке новых методов ускорения, однако до настоящего времени альтернативные методы ускорения все еще не вытеснили классические принципы ускорения заряженных частиц.

Диссертация посвящена исследованию ускорения сгустков заряженных частиц в плазменно-диэлектрических структурах. Основной целью исследования является построение теоретической базы для применения альтернативных методов ускорения.

Решена важная теоретическая и прикладная задача ускорения и транспортировки сгустков заряженных частиц в диэлектрических и плазменных кильватерных структурах. Для обеспечения одновременной фокусировки ускоряемых и ведущих сгустков впервые предложено использовать гибридную структуру, объединяющую достоинства чисто диэлектрических кильватерных структур и чисто плазменных кильватерных структур. Путем аналитических исследований и численного моделирования показано, что проблема устойчивости ускоряемых сгустков может быть успешно разрешена при использовании плазменно-диэлектрических замедляющих структур. Новизна полученных результатов подтверждается приоритетом в опубликованных научных журналах, их достоверность определяется использованием для их получения адекватных аналитических и численных методов, апробацией на научных конференциях и семинарах. Результаты и выводы, полученные при выполнении диссертационных исследований будут использованы при разработке и конструировании макетов ускоряющих секций кильватерных ускорителей, а также при разработке мощных источников сверхвысокочастотных колебаний.

Впервые представлена схема получения и получены аналитические выражения, описывающие кильватерные поля, возбуждаемые в плазменно-диэлектрическом волноводе сгустком заряженных частиц. Рассмотрена линейная теория возбуждения кильватерных полей. Показано, что собственное квазистатическое поле сгустка не влияет на радиальную динамику сгустка при энергиях сгустка начиная с МеВ-ного диапазона.

Рассмотрена ситуация возбуждения кильватерных полей последовательностью электронных сгустков. Изучено влияние плотности плазмы на амплитуду кильватерного поля в диэлектрической структуре. Рассмотрена зависимость спектров кильватерного поля в плазменно-диэлектрической структуре от плотности плазмы.

Проведено численное моделирование возбуждения кильватерных полей в плазменно-диэлектрическом волноводе для линейного и для сильно нелинейного режимов возбуждения кильватерных полей в плазменно-диэлектрической структуре.

Построена математическая модель, описывающая радиальную динамику сгустка заряженных частиц в плазменно-диэлектрическом ускорителе. Выполнено численное моделирование динамики ускоряемого сгустка в плазменно-диэлектрической структуре. Учтено влияние начального эмиттанта сгустка и предложена новая схема транспортировки сгустков заряженных частиц в диэлектрическом кильватерном ускорителе при помощи массива плазменных ячеек.

Ключевые слова: кильватерное поле, плазма, диэлектрический волновод, плазменно-диэлектрический волновод, ускорение, сгусток заряженных частиц, фокусировка, транспортировка сгустков.